

ПРИМЕНЕНИЕ ПОНЯТИЯ «ХИМИЧЕСКИЙ ЭКВИВАЛЕНТ ЭЛЕМЕНТА» В ТЕОРИИ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Выполнен обзор литературы по методам расчета химического эквивалента углерода. Показана необходимость выбора его математических моделей в соответствии с назначением конструкции и степени ее ответственности.

Ключевые слова: теория сварочных процессов, химический эквивалент углерода, стальные конструкции, стали феррито – перлитного класса.

V. I. Panov, S. V. Kandalov

THE USE OF THE EXPRESSION “CHEMICAL EQUIVALENT OF AN ELEMENT” IN THE THEORY OF WELDING PROCESSES

The review of literature is executed on the methods of calculation of chemical equivalent of carbon. The necessity of choice of his mathematical models is shown in accordance with setting of construction and degree of her responsibility.

Keywords: theory of welding processes, the chemical equivalent of carbon, steel structures, steel ferrite – pearlitic class.

Понятие эквивалент, означает нечто равноценное или соответствующее в каком-либо отношении чему-либо и т. д. Оно используется в различных разделах науки («электрохимический эквивалент», «эквивалент вещества», «тротильный эквивалент», «механический эквивалент тепла», «тепловой эквивалент работы» и др.).

Понятие «эквивалент углерода» [carbon equivalent] нашло широкое применение в теории сварочных процессов при оценке конструктивной, технологической и эксплуатационной прочности сварных соединений низко-,

средне-, высокоуглеродистых сталей, низколегированных сталей с феррито-перлитной структурой. По величине химического эквивалента углерода определяют целесообразность или необходимость предварительного подогрева и термической обработки.

Его значение находят на основании математической обработки результатов сварки различных технологических проб, например, на склонность к образованию горячих или холодных трещин. Изучается твердость зоны термического влияния, изменяющаяся в соответствии с характером структурных превращений в зависимости от химического состава стали, выявляя степень эффективности каждого элемента по сравнению с углеродом. Особенно важен этот показатель при ремонтной сварке или при восстановлении работоспособности литых и кованных базовых деталей тяжело нагруженного оборудования, выполненных из перечисленных сталей, в том числе и из марок, не рекомендуемых для изготовления сварных конструкций.

В общем виде формула расчета химического эквивалента углерода $C_{\text{ЭКВ}}$ имеет вид

$$C_{\text{ЭКВ}} = C + \frac{Mn}{k_{Mn}} + \frac{Si}{k_{Si}} + \frac{Cr}{k_{Cr}} + \frac{Ni}{k_{Ni}} + \frac{Mo}{k_{Mo}} + \frac{V}{k_V} + \frac{Cu}{k_{Cu}} + \frac{P}{k_P}$$

где $C, Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V, Cu, P$ – массовые доли химических элементов; $k_{Mn}, k_{Si}, k_{Cr}, k_{Ni}, k_{Mo}, k_V, k_{Cu}, k_P$ – коэффициенты влияния упомянутых химических элементов, увеличивающих устойчивость аустенита и соответственно понижающих температуру начала мартенситного превращения стали.

В другом случае оценивается суммарное влияние легирующих элементов на величину эквивалента углерода, например:

$$C_{\text{ЭКВ}} = C + \frac{Mn}{k_{Mn}} + \frac{Ni}{k_{Ni}} + \frac{Cr + Mo + V}{\sum_{\text{л.э.}}},$$

где $\sum_{\text{л.э.}}$ – суммарный коэффициент влияния элементов, входящих в числитель этой дроби.

По одной из методик температуру предварительного подогрева рассчитывают по величине полного эквивалента углерода

$$[C] = [C]_x + [C]_p,$$

где $[C]_x$ – химический эквивалент углерода, $[C]_p$ – размерный эквивалент углерода.

В свою очередь, величина $[C]_x$ связана с температурой начала мартенситного превращения переохлажденного аустенита:

$$360 [C] = 360 [C] + 40 (Mn + Cr) + 20 Ni + 28 Mo.$$

Анализ около 60 известных моделей расчета химического эквивалента углерода показал следующее.

В состав любой марки стали рассматриваемого класса входят четыре химических элемента: углерод, марганец, хром и никель. Именно эти элементы входят во все расчетные формулы.

Важнейшую роль в величине химического эквивалента углерода оказывает непосредственно углерод. Во всех формулах $k_c = 1$. Марганец оценивается различными значениями k_{Mn} – от 4 до 20. На основе сопоставления влияния системы С - Mn на прочностные свойства металла сварных соединений рекомендовано принимать k_{Mn} в интервале от 10 до 20 для сталей с содержанием углерода до 0.1%. Для сталей с содержанием углерода более 0.1 % роль марганца в изменении механических свойств усиливается, что отражается в снижении k_{Mn} до 4...6. И. Гривняк рекомендует применять широко известную формулу Международного института сварки (IIW) для сталей с содержанием С более 0.18% .

В подавляющем большинстве случаев кремний не принимается во внимание, либо его влияние незначительно. Коэффициент k_{Si} колеблется в интервалах от 4 до 7 и от 24 до 30.

В низколегированных сталях велико влияние хрома. Минимальное значение коэффициента k_{Cr} равно 3 - 5, максимальное значение его значение – 23, интервал 9...20 занимает промежуточное значение.

Принято считать, что никель оказывает самое благоприятное влияние на

свариваемость, поэтому диапазон k_N принят равным от 40 до 60. Некоторые исследователи оценивают участие этого элемента коэффициентом $k_{Ni} = 15$.

Подводя итоги вышесказанному, отметим, что каждая из известных формул расчета химического эквивалента углерода приемлема лишь для определенной группы сталей, конкретных конструкций, степени их ответственности и т. д. Технология сварки углеродистых сталей отличается от технологии сварки низколегированных сталей. Особую лепту вноси микролегирование стали молибденом, ванадием и другими элементами. Следует признать и относительную достоверность расчетных формул. Метод оценки свариваемости по эквиваленту углерода $C_{\text{экв}}$ является ориентировочным и далеко не всегда дает верные результаты. Конструкционная, технологическая и эксплуатационная прочности сварных соединений могут определяться исходной термической обработкой основного металла, влияющей на величину зерна аустенита, и другими факторами. Нельзя и не учитывать, что при многопроходной сварке происходит процесс термоциклирования металла околошовной зоны, что вызывает самоотпуск закалочных структур зоны термического влияния. Металл корня одностороннего многопроходного шва под влиянием угловой деформации в интервале температур синеломкости подвергается старению.

В ответственных конструкциях применяется термически упрочненные высокопрочные стали, характеризующиеся мелким зерном. В этом случае температура начала распада аустенита на участке перегрева зоны термического влияния будет ниже, чем для случая крупного зерна (горячекатаное состояние) и кинетика фазовых и структурных превращений будет несколько отличаться. При малых скоростях охлаждения зоны термического влияния термоупрочненные стали склонны к разупрочнению на участках перегрева (выделение полигонального феррита) и высокого отпуска (падение твердости и ударной вязкости). Поэтому широко известная модель Ито – Бессею включает в себя, помимо химического эквивалента углерода, влияние толщины свариваемого соединения, его жесткость и содержание водорода. В

европейских стандартах к этому перечню добавлена величина погонной энергии.

Тем не менее, исключение условий образования горячих и холодных трещин по-прежнему является серьезной технологической задачей обеспечения прочности сварных конструкций. Большое влияние оказывают опыт и личные качества лица (склонность к риску и др.), принимающего или иное технологическое решение выполнения сварочных работ.

Список литературы

1. ГОСТ 525–2005 «Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия».
2. ГОСТ 19281–2014 «Прокат из стали повышенной прочности. Общие технические условия».
3. ГОСТ 27772–88 «Прокат для строительных стальных конструкций».
4. EN 1011–2: 2001 «Рекомендации по сварке металлических материалов. Дуговая сварка ферритных (углеродистых и низколегированных сталей)».
5. Гривняк И. Свариваемость сталей : пер. со словац. Л. С. Гончаренко ; под ред. Э. Л. Макарова. – М. : Машиностроение. 1984. – 216 с.
6. Гривняк И. Свариваемость современных высокопрочных сталей // Сварка и родственные технологии в XXI веке. – Киев. 1998. – С. 41–55.
7. Ефименко Л. А., Елагина О. Ю., Вышемирский Е. М. Особенности подхода к оценке свариваемости низкоуглеродистых высокопрочных трубных сталей // Сварочное производство. – 2010. – № 6. – С. 5–11.
8. Ефименко Л. А., Прыгаев А. К., Елагина О. Ю. Металловедение и термическая обработка сварных соединений : учебное пособие. – М. : Логос, 2007. – 456 с.
9. Касаткин Б. С., Мусияченко В. Ф. Низколегированные стали высокой прочности для сварных конструкций. – Киев : Техніка, 1970. – 188 с.
10. Кириллов Е. А., Панов В. И., Сумрин С. Г. Свариваемость сталей, применяемых в тяжелом машиностроении // Сварочное производство. – 1989. – № 3. – С. 16–19.
11. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке. – М. : Машиностроение, 1981. – 248 с.
12. Литвинов А. П., Дерломенко В. В. Свариваемость и работоспособность сварных соединений // Автоматическая сварка. – 2010. – № 9. – С. 50–56.
13. Сварка и свариваемые материалы : в 3-х томах. Т. 1. Свариваемость материалов : Справ. изд. / Под ред. Э. Л. Макарова. – М. : Металлургия, 1991. – 528 с.

14. Сефериан Д. Металлургия сварки / пер. с французского. – М. : Машгиз, 1963. – 347 с.
15. Макаров Э. Л., Якушин Б. Ф. Технологическая прочность металлов при сварке // Сварка в машиностроении. Том 3 / под ред. В. А. Винокурова. – М. : Машиностроение, 1979. – С. 393–435.
16. Ющенко К. А., Дерломенко В. В. Анализ современных представлений о свариваемости // Автоматическая сварка. – 2005. – № 1. – С. 9–13.
17. Углеродный эквивалент и свариваемость сталей [Электронный ресурс]. URL: <http://metallovedeniye.ru/svarka/uglerodnyj-ekvivalent-i-svarivaemost-stalej.html> (дата обращения: 17.11.2015). Загл. с экрана.